نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۳، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۳۹۶ ص.۳۹۲-۳۷۹

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 13, No. 2, June. July. 2017, p. 379- 392

آنالیز انتقال حرارت و جرم طی فرآیند سرخ‌کردن خلال سیب‌زمینی

حسن صباغی[۱]- امان محمد ضیائی‌فر[۲]*- مهدی کاشانی‌نژاد[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۵

چکیده

در این پژوهش، انتقال حرارت و جرم در فرآیند سرخ‌کردن به‌طور جامعی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، عملیات سرخ‌کردن خلال سیب زمینی در یک سرخ‌کن مجهز به سیستم ترموکنترلر با ترموکوپل نوع K، در سه دمای مختلف روغن ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ °C به مدت۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه انجام گرفت. تغییرات دمای مرکزی محصول طی سرخ کردن با استفاده از ترموکوپل نوع T متصل به دستگاه ثبت داده در کامپیوتر ثبت گردید. محتوی رطوبت و روغن نمونه‌ها نیز در هر زمان و دمای فرآیند اندازه‌گیری شد. پارامترهای انتقال حرارت و جرم با استفاده از نمودارهای نسبت‌های دمایی و غلظت بدون بُعد و معادلات تجربی با هدف توسعه روشی واقع بینانه در تخمین، برآورد شد. نتایج نشان داد، عدد بایوت انتقال جرم (Bi_m)، ضریب انتقال جرم و نفوذ موثر رطوبت با افزایش دمای روغن به‌طور معنی‌داری زیاد شد. در مدل‌های رگرسیونی، با افزایش دمای بستر فرآیند محتوی تعادلی روغن در زمان بی‌نهایت کاهش یافت و می‌توان گفت با افزایش دما، جذب روغن کاهش می‌یابد. از طرفی ارتباط خطی بین ثابت‌های سنتیک کاهش آب و جذب روغن مشاهده شد که تائید کننده تاثیر پیش تیمار خشک کردن جزئی در کاهش ثابت سنتیک جذب روغن نیز است. این تاثیر می‌تواند به دلیل فشردگی ماتریس ماده غذایی و در نتیجه کاهش نفوذ روغن بعد از خروج از سرخ‌کن طی سرد شدن باشد. در نهایت، با افزایش دمای فرآیند نیز عدد بایوت انتقال حرارت (Bi_h)، ضریب انتقال حرارت جابجایی و هدایت حرارتی محصول به‌طور معنی‌داری کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: سرخ‌کردن، خلال سیب‌زمینی، عدد بایوت، انتقال جرم، انتقال حرارت.

مقدمه

مواد غذایی اغلب دارای ساختار پیچیده‌ای هستند که می‌تواند به عنوان محیطی متخلخل با خاصیت موئینگی جاذب رطوبت[۴] در نظر گرفته شوند. مهاجرت رطوبت در مواد غذایی می‌تواند به مکانیسم‌های مختلفی از قبیل انتشار مولکولی[۵]، موئینگی[۶]، انتقال حجمی، تجمع[۷] و انتشار سطحی نسبت داده شود (Saravacos and Maroulis, 2001).

تبادل همزمان رطوبت و حرارت در بسیاری از عملیات فرآوری مواد غذایی از جمله خشک‌کردن، دوددهی، پختن و سرخ‌کردن مشاهده می‌شود و مدل‌های ریاضی ابزارهایی مفید در طراحی و تحلیل این فرآیندها می‌باشند. به دلیل پیچیدگی استفاده این مدل‌ها، فرضیات مختلفی در جهت ساده‌سازی آن‌ها ارائه شده است. یک فرض معمول در این رابطه این است که فرآوری مواد غذایی تحت شرایط هم‌دما[۸] اتفاق می‌افتد که این امر مشکل انتقال دو جانبه رطوبت و گرما را مرتفع می‌سازد (Zheleva and Kamburova, 2009). همچنین قانون انطباق[۹] یا قانون مجموع[۱۰] به ما اجازه می‌دهد می‌دهد تا با دانستن هندسه یک جسم از مجموع یا اختلاف برای بیان یک پدیده استفاده کنیم (Taler, 2014). بر این اساس شکل هندسی خلال سیب‌زمینی به صورت یک مکعب مستطیل می‌تواند یک صفحه محدود[۱۱] و حاصل برخورد دو صفحه نامحدود[۱۲] فرض شود (Yildiz *et al.*, 2007).

به‌طور کلی، سرخ کردن یک فرآیند دو مرحله‌ای است: سرخ کردن جزئی[۱۳] و سرخ کردن پایانی. طی سرخ کردن جزئی بخشی از

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار، استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه منابع طبیعی گرگان.
(* - نویسنده مسئول: Email: ziaiifar@gmail.com)
DOI: 10.22067/ifstrj.v1395i0.52271
4 Hygroscopic capillary
5 Molecular diffusion
6 Capillarity
7 Effusion
8 Isothermal
9 Superposition rule
10 Summation rule
11 Finite plate
12 Infinite plate
13 Par-frying

آب تبخیر شده و تشکیل پوسته[1] و هسته[2] شروع می‌گردد. بعد از این مرحله محصول منجمد و بسته‌بندی شده و توزیع می‌گردد. سرخ کردن پایانی در داخل رستوران‌ها یا خانه به‌طور مختصر قبل از مصرف اتفاق می‌افتد و محصول نهایی با بافت و طعم مطلوب را ایجاد می‌نماید (Andres *et al.*, 2012). طی سرخ‌کردن حرارت از روغن با انتقال حرارت جابجایی به سطح ماده غذایی منتقل شده و سپس بوسیله انتقال حرارت هدایتی به داخل ماده غذایی وارد می‌شود (Costa *et al.*, 1999). جذب روغن یک پدیده سطحی است و به مقدار آب جابجا شده و رطوبت از دست داده بستگی دارد (Ufheil and Escher, 1996).

پیچیدگی انتقال حرارت و جرم در فرآیند سرخ‌کردن بیشتر از سایر فرآیندها خواهد بود، زیرا علاوه بر این پدیده‌ها، تغییرات شیمیایی و فیزیکی در بستر حرارتی و محصول نیز رخ می‌دهد که آنالیز این فرآیند را دشوارتر می‌نماید (Parkash and Gertz, 2004). سرخ کردن عملیات آب‌زدایی است که طی آن انتقال حرارت و جرم به‌طور همزمان اتفاق می‌افتد و در نتیجه دو جریان مخالف آب (به سمت خارج از محصول) و روغن (به سمت داخل محصول) اتفاق می‌افتد (Andres *et al.*, 2012). انتظار می‌رود که جوشیدن شدید آب و تولید بخار از نفوذ روغن به داخل ساختار و منافذ غذا جلوگیری کند، زیرا این دو جریان انتقال جرم در جهت مخالف هم هستند (Blumenthal and Stier, 1991). همان‌طور که آب خارج شده و کاسته می شود احتمال ورود و نفوذ روغن به منافذ افزایش می‌یابد. اگر نفوذ روغن در طی سرخ شدن محدود در نظر گرفته، شود انتقال بخار آب ممکن است مستقل از انتقال روغن فرض شود. این فرض برای تجزیه و تحلیل انتقال حرارت در طی سرخ کردن در نظر گرفته می‌شود (Farid and Chen, 1998). در ابتدای فرآیند تنها آب آزاد محصول بخار می‌شود اما مرز تبخیر آب به‌عنوان سطح خشک کردن به تدریج به سمت داخل محصول حرکت می‌کند. در واقع، در هنگام سرخ کردن ماده‌ای نظیر خلال‌های سیب‌زمینی، آب از بخش مرکزی ماده به‌صورت شعاعی به طرف خارج حرکت کرده و جانشین آب از دست رفته در سطوح خارجی می‌شود (Pedreschi *et al.*, 2005). دما در این مرز از ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد تجاوز نمی‌کند. تشکیل پوسته باعث افزیش مقاومت در برابر انتقال بخار آب شده و موجب زیاد شدن فشار در ناحیه سطحی می‌گردد (Loon, 2007). در واقع، انتقال حرارت و جرم طی سرخ کردن بوسیله انتقال حرارت در سطح محصول کنترل می‌شود و سرعت تبخیر آب به اختلاف دمای بین روغن و نقطه جوش آب بستگی دارد (Vitrac *et al.*, 2002).

به‌منظور تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی فرآیند سرخ‌کردن پارامترهای انتقال حرارت و جرم مانند نفوذ حرارتی موثر[3]، ضریب انتقال حرارت، نفوذ رطوبت موثر، ضریب انتقال رطوبت یا جرم و ضریب انتقال حرارت هدایتی محصول باید بررسی گردند. اثر متقابل میان روغن و سطح ماده غذایی بسیار پیچیده است، زیرا جنبش شدید حباب‌های بخار آب خروجی از ماده غذایی به داخل روغن موجب تلاطم قابل توجهی شده و روی ضریب انتقال حرارت موثر خواهد بود (Ahromrit and Nema, 2010). بنابراین در فرآیند حرارتی سرخ کردن نفوذ حرارت و نفوذ جرم به‌صورت وابسته به یکدیگر می‌باشند. در واقع اگر عملیات انتقال جرم به صورت انتقال یک ماده به داخل ماده دیگر در مقیاس مولکولی تعریف شود، این نفوذ مولکولی در اثر حرکت مولکول‌های یک سیستم و به علت وجود انرژی حرارتی انجام می‌پذیرد. با مطالعه تئوری جنبشی گازها می‌توان این پدیده‌های نفوذی را از نظر کمی مطالعه کرد. در تئوری جنبشی گازها فرض بر این است که هر مولکول در مسیر مستقیم و با سرعت ثابت حرکت نموده و پس از طی مسافتی به مولکول دیگر برخورد می‌کند و بنابراین جهت و سرعت حرکت آن تغییر می‌کند. مقدار متوسط مسافتی که یک مولکول طی می‌کند تا با مولکول دیگر برخورد نماید، مسیر آزاد متوسط[4] مولکول نامیده می‌شود. بدیهی است که سرعت متوسط حرکت مولکول بستگی به درجه حرارت خواهد داشت. به دلیل برخوردهای متعدد، مولکول یک مسیر پرپیچ و خم را طی می‌کند. مسافت خالصی را که مولکول در زمان معین و در جهت معین طی می‌کند، شدت نفوذ آن می‌نامند. البته این مسافت تنها جزئی از کل مسیر واقعی طی شده توسط مولکول می‌باشد و نفوذ مولکولی پدیده‌ای کند است. سرعت نفوذ مولکولی با کاهش فشار (که سبب کاهش تعداد برخوردها می‌شود) و یا با افزایش درجه حرارت (که سرعت مولکولی را زیاد می‌کند)، می‌تواند افزایش یابد (Treybal, 1995).

محاسبات انتقال جرم براساس سرعت کلی اتلاف آب، همچنین سهولت نسبی جابجایی آب از بین یک غذای در حال آب‌زدایی و از دیواره‌ها و لبه‌های آن است. علاوه بر انتقال آب، سه پدیده انتقال جرم دیگر نیز وجود دارند که از نظر کمیت کوچکترند که شامل جذب روغن به داخل غذا، حرکت آهسته مواد غذایی محلول در آب به سمت خارج در اثر پمپاژ آب در هنگام سرخ‌کردن و تراوش یا ذوب شدن ترکیبات غذا در اثر حرارت دادن و ورود آن‌ها به داخل روغن است. محققین زیادی کاهش آب ماده غذایی در طی سرخ‌کردن را براساس مدل قانون فیک[5] برای انتشار بیان کرده‌اند. کاربرد این مدل در انتشار آب در مواد جامد به‌صورت ضریب موثر تعریف می‌شود که خصوصیت انتقال کلی بوده و شامل تمام مکانیسم‌های دخیل در انتقال آب

1 Crust
2 Core

3 Effective thermal diffusivity
4 Mean free path
5 Fick's law

می‌باشد. اگرچه علاوه بر انتشار، آب می‌تواند از طریق شیب هیدرودینامیک[1] و جریان مویینگی مطابق ساختار ماده نیز منتقل گردد (Saravacos and Maroulis, 2001) و احتمالاً تمامی این عوامل به‌طور کامل توسط ضریب موثر انتشار بیان نخواهد شد. همچنین تئوری انتشار برخی از جنبه‌های ساختاری مرتبط به آب‌زدایی محصول مانند چروکیدگی[2] را در نظر نمی‌گیرد. به همین دلایل ضریب موثر انتشار برای آب به‌عنوان خصوصیت کلی انتقال جرم در هر سیستمی که تمام مکانیسم‌های انتقال آب را شامل می‌شود، می‌تواند مفروض گردد. البته به‌منظور جلوگیری از ساده‌سازی بیش از حد این فرآیند، می‌تواند استفاده از یک ضریب متغیر انتشار که تغییرات خصوصیات فیزیکی ماده طی سرخ‌کردن را نیز در نظر می‌گیرد، پیشنهاد گردد (Troncoso and Pedreschi, 2009).

ضریب انتقال حرارت از مهمترین پارامترها برای حفظ کیفیت محصول سرخ‌شده می‌باشد (Alvis *et al.*, 2009). ضریب انتقال حرارت طی فاز جوشش نقش بحرانی در تشکیل خصوصیات حسی محصول، تحریک قهوه‌ای شدن (واکنش مایلارد) و واکنش‌های کاراملیزه شدن که موجب پخش شدن کامل عطر و طعم، رنگ و بافت ماده غذایی می‌شوند، دارد. کیفیت پوسته تشکیل شده در طی فاز جوشش عامل بسیار مهمی در نرخ انتقال حرارت و بافت مطلوب محصول می‌باشد. بعلاوه جریان حرارتی در طول ماده غذایی نیازمند در نظر گرفتن شرایط مرزی برای معادلات انتقال حرارت با استفاده از ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌باشد. بنابراین اندازه‌گیری ضرایب انتقال حرارت نقش مهمی در فهم پیچیدگی‌های فرآیند سرخ‌کردن دارد (Farkas *and* Hubbard, 2000).

Krokida و همکاران (۲۰۰۰) در پژوهشی با توجه به معادلات فیک و آرنیوس[3] نتیجه گرفتند که انتقال جرم طی سرخ‌کردن تابعی از زمان و دمای سرخ‌کردن می‌باشد. همچنین بیان کردند که دمای سرخ کردن و ضخامت خلال‌های سیب‌زمینی تاثیر معنی‌داری بر روی جذب روغن و کاهش آب محصول دارد. به همین ترتیب در تحقیقی دیگر Gupta و همکاران (۲۰۰۰) نیز میزان کاهش آب محصول با زمان سرخ کردن در دماهای مختلف روغن را به رطوبت لحظه‌ای وابسته دانستند و در محتوی رطوبت بالاتر سرعت خروج آب محصول بیشتر مشاهده شد. Moyano و Pedreschi (۲۰۰۶) گزارش کردند که در دماهای بالاتر، بدلیل خروج شدیدتر رطوبت جذب روغن در چیپس‌های سیب‌زمینی با توجه به وجود جریان‌های مخالف، انتقال جرم کمتر است.

Yildiz و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی به‌منظور مطالعه انتقال حرارت و جرم روشی را بر مبنای اندازه‌گیری دما و محتوی رطوبت طی سرخ‌کردن به‌کار گرفتند. روش‌های قبلی مطالعه انتقال حرارت وابسته به اندازه‌گیری دمای سطحی برش‌های سیب‌زمینی طی سرخ‌کردن بود. مشکل مطالعه براساس دمای سطحی این است که محل قرار گیری ترموکوپل بسیار اهمیت دارد و با تغییر اندک در محل ترموکوپل، دما تغییر زیادی کرده و دمای واقعی ثبت نخواهد شد. در این روش نیاز به دانستن محل دقیق ترموکوپل نبود که این امر پتانسیل خطا طی تخمین را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. نتایج آن‌ها نشان داد که طی سرخ کردن برش‌های سیب‌زمینی با افزایش دمای فرآیند ضریب انتقال جرم بر پایه رطوبت به‌صورت خطی افزایش یافت در حالی که انتشار رطوبت به شکل نمایی زیاد شد و ضریب انتقال حرارت نیز کاهش پیدا کرد.

Farinu و Baik (۲۰۰۷) تاثیر اندازه محصول و دمای روغن را روی ضریب انتقال حرارت جابجایی طی سرخ‌کردن برش‌های سیب زمینی بررسی کردند. ضریب انتقال حرارت با استفاده از موازنه انرژی بین روغن و نمونه طی سرخ‌کردن تخمین زده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که حداکثر ضریب انتقال حرارت جابجایی در زمان‌های ابتدایی فرآیند (حدود ۱۲۰-۸۰ ثانیه) مشاهده شد. ضریب انتقال حرارت با دمای روغن رابطه مستقیم و با اندازه نمونه رابطه معکوس داشت. همچنین Farinu و Baik (۲۰۰۸) تاثیر دمای روغن و اندازه نمونه را روی ضریب انتقال جرم طی سرخ‌کردن برش‌های سیب زمینی نیز بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ضریب انتقال جرم جابجایی نیز با افزایش دمای روغن زیاد شده اما با افزایش اندازه نمونه کاهش می‌یابد.

نتایج بدست آمده از مطالعات محققین با روش‌های مختلف دارای ناسازگاری می‌باشد. در این پژوهش، پدیده‌های انتقال در فرآیند سرخ کردن با هدف بررسی تاثیر دمای فرآیند مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین طی سرخ‌کردن علاوه بر اعداد بدون بعد جزئیات انتقال جرم به‌طور همزمان به صورت مدل‌های تجربی انتقال رطوبت و روغن نیز آنالیز می‌گردد. هدف از این پژوهش توسعه واقع بینانه مدل ریاضی ساده در بیان پدیده‌های انتقال است. تاکنون معادلات تجربی در کنار مدل‌های ریاضی انتقال جرم در فرآیند سرخ کردن تبیین نشده‌اند. پیش‌بینی هدایت حرارتی محصول به‌صورت مقایسه دو معادله تجربی برای نخستین بار انجام می‌گیرد. در نهایت ارتباط متغیرهایی مانند ضرایب سنتیکی انتقال رطوبت و روغن، ضریب انتقال جرم، ضریب نفوذ موثر و ضریب انتقال حرارت جابجایی با دمای فرآیند در قالب معادله آرنیوس به‌صورت همزمان بررسی می‌گردد.

1 Hydrodynamic gradient
2 Shrinkage
3 Arrhenius

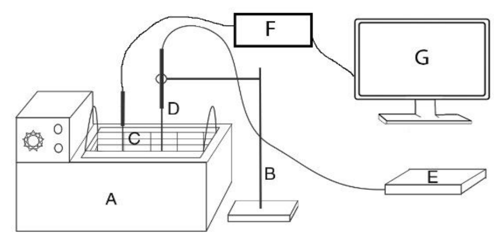
مواد و روش ها

آماده سازی خلال‌های سیب زمینی

برای انجام آزمایش سیب‌زمینی واریته آگریا[1] پاییزه از بازار محلی در استان گلستان تهیه شد. سپس به روش دستی خلال‌هایی در ابعاد ۵×۵×۵۰mm³ بعد از شستشو و پوست‌گیریریال آماده شد. جهت ثبت وزن اولیه، خلال سیب‌زمینی قبل از شروع فرآیند سرخ‌کـردن تـوزین شد.

عملیات سرخ‌کردن و ثبت دمای محصول

فرآیند سـرخ‌کـردن در یـک سـرخ‌کـن (Deep fryer: Model BDZ-5A-1) حاوی دو لیتر روغن آفتـابگردان و مطـابق شـکل (۱) مجهز به سیستم ترموکنترلر با ترموکوپل نوع K، که دمای روغـن را در دمای ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ °C ثابت نگه می‌دارد، انجام گرفت. زمان فرآیند برای هر نمونه آزمایشی در هر دما به مـدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه در نظر گرفته شد. ثبت تغییـرات دمـایی مرکـز محصـول توسط ترموکوپل نوع T با فاصله زمانی ۲ ثانیه مشابه کـار Sahin و همکاران (۱۹۹۹) بوسیله دستگاه ثبت داده[2] (Data logger: Model TC-08 "RS-232" Pico technology) و نـرم‌افـزار پیکـولاگ[3] در رایانه انجام شد. این آزمایش در سه تکرار انجام گرفت.



شکل ۱-تجهیزات عملیات سرخ کردن و ثبت دما؛ سرخ کن (A)، پایه نگهدارنده (B)، ترموکوپل نوع T (C)، ترموکوپل نوع K (D)، کنترل‌کننده دما (E)، ثبت کننده داده (F)، رایانه (G)

اندازه‌گیری رطوبت و روغن

روغن سطحی خلال‌های سیب‌زمینی سرخ شده بعـد از خـروج از سرخ کن با کاغذ جاذب گرفته شد و سپس برای اندازه‌گیری رطوبـت در آون (Binder FD53) با دمای ۱۰۳ °C به مدت ۱۶ ساعت قـرار گرفت. سپس نمونه خشک برای استخراج روغن به روش سوکسله با حلال پترولیوم اتر به مدت ۶ ساعت استفاده شد. میزان رطوبت نمونه بر مبنای وزن خشک بدون روغن محاسبه شد (AOAC, 2000).

تخمین پارامترهای انتقال جرم

داده‌های مربوط به تغییرات رطوبـت-زمـان بـرای خـلال سـیب زمینی در طی سرخ کردن برای تخمین پارامترهای انتقال جرم ماننـد عدد بایوت، ضریب انتقال جرم و نفوذ رطوبت استفاده شـدند. خـلال سیب‌زمینی به صورت صفحه نامحدود در نظر گرفتـه شـد و هماننـد Yildiz و همکاران (۲۰۰۷) غلظت به عنوان تابعی از زمان و موقعیت برای یک صفحه نامحدود با در نظر گرفتن شرایط مـرزی و مـانگین تغییرات غلظت در حجم کلی محصول مطابق رابطه (۱) فرض شد.

$$\frac{\overline{C}(t)-C_{\infty}}{C_i-C_{\infty}}=\frac{2\sin^2\mu_1}{\mu_1[\mu_1+\sin\mu_1\cos\mu_1]}\exp\left(-\mu_1^2\frac{Dt}{L^2}\right) \quad (۱)$$

در رابطه فوق $\bar{C}(t)$ میزان متوسط رطوبت محصول در زمـان t برحسب گرم آب بر گرم ماده خشک (g/g, db)، C_i محتوی رطوبـت اولیه محصـول (g/g, db)، C_∞ محتـوی رطوبـت تعـادلی محصـول (رطوبت محصول در زمان بی‌نهایت) یا رطوبت بستر فرآیند است که می‌تواند صفر در نظر گرفته شـود. L نصـف ضـخامت خـلال سـیب زمینی بر حسب متر، D ضریب نفوذ موثر (m^2/s)، k_c ضریب انتقـال جرم (m/s)، μ_1 ریشه تابع غیر تجربی برای تیغه نامحدود و t زمان بر حسب ثانیه می‌باشد. مطابق قانون انطبـاق رابطـه (۲) بـرای دو بُعـد خلال سیب زمینی بدست می‌آید:

$$\ln\left(\frac{\overline{C}(t)-C_{\infty}}{C_i-C_{\infty}}\right)=2\ln E-2\mu_1^2\frac{Dt}{L^2} \quad (۲)$$

$$E=\frac{2\sin^2\mu_1}{\mu_1[\mu_1+\sin\mu_1\cos\mu_1]} \quad (۳)$$

با رسم منحنی لگاریتم طبیعی تغییرات غلظت در برابـر زمـان و بدست آوردن عرض از مبداء خط حاصل، با استفاده از رابطه (۳) مقدار μ_1 و سپس با استفاده از شیب در رابطه (۲)، مقدار ضریب نفوذ مـوثر (D) محاسبه شد. در نهایت عدد بدون بُعد بایوت، انتقال جرم (Bi_m) و سپس ضریب انتقال جرم (k_c) نیـز بـا اسـتفاده از رابطـه (۴) مطـابق Dincer (۱۹۹۶) محاسبه شد.

$$Bi_m=\mu_1\tan\mu_1=\frac{k_cL}{D} \quad (۴)$$

تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی

کسر دمایی انجام نشده در حالت صفحه محدود از حاصل ضرب کسر دمایی دو صفحه نامحدود مطابق رابطه (۵) بدست می‌آید.

---
1 Agria
2 Data logger
3 Picolog

$$\left(\frac{T(x,y,t)-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)_{\text{finite plate}}=\left(\frac{T(x,t)-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)_{\text{infinite plate}}\times\left(\frac{T(y,t)-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)_{\text{infinite plate}}$$
(۵)

در رابطه فوق $T(x, t)$ و $T(y, t)$ دمای محصول در هر نقطـه و در هر زمان، T_i دمای اولیه محصول و T_∞ دمای بستر فرآیند برحسب °C است. ضریب انتقال حرارت جابجایی با حل معادلات برای هدایت حرارت یک بُعدی در مختصات کارتزین مشـابه Yildiz و همکـاران (۲۰۰۷) مطابق رابطه (۶) با فرض شرایط مرزی برآورد شد.

$$\left(\frac{T(x,t)-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)\times\left(\frac{T(y,t)-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)=A\exp\left(-2\mu_1^2\frac{\alpha t}{L^2}\right)$$
(۶)

$$A=\left(\frac{2\sin\mu_1}{\mu_1+\sin\mu_1\cos\mu_1}\right)^2\times\cos\left(\mu_1\frac{x}{L}\right)\times\cos\left(\mu_1\frac{y}{L}\right)$$
(۷)

در روابط فوق L نصف ضخامت خلال سیب زمینی بر حسب متر، α ضریب نفوذ حرارتی (m^2/s)، μ_1 ریشه تابع غیر تجربی بـرای تیغـه نامحدود و t زمان بر حسب ثانیه می‌باشد. با گرفتن لگاریتم طبیعی از دو طرف رابطه (۶) به رابطه (۸) خواهیم رسید:

$$\ln\left(\frac{T(x,y,t)-T_\infty}{T_i-T_\infty}\right)=\ln A-2\mu_1^2\frac{\alpha t}{L^2} \qquad (۸)$$

با توجه به رابطه (۸) با رسم لگاریتم طبیعی کسر دمـایی انجـام نشده در برابر زمان فرآیند شیب بخش خطی منحنی برابر با $-2\mu_1^2\frac{\alpha t}{L^2}$ خواهد بود. با توجه به اینکه نفوذ حرارتی α و نصف ضخامت خـلال سیب زمینی مشخص است، μ_1 قابل محاسبه خواهد بـود. در نهایـت عدد بدون بُعد بایوت انتقـال حـرارت و h یـا ضـریب انتقـال حـرات جابجایی (W/m^2 °C) با استفاده از رابطـه (۹) قابـل تخمـین اسـت. خصوصیات حرارتی سیب زمینی که ثابت فرض شده است در جـدول (۱) آمده است.

$$Bi_h=\mu_1\tan\mu_1=\frac{hL}{k} \qquad (۹)$$

جدول ۱- ویژگی‌های حرارتی سیب زمینی

ویژگی حرارتی	میزان	منبع
هدایت حرارتی (W/m °C)	۰/۵۵۴	*Singh and Heldman (2001)*
دانسیته (kg/m^3)	۱۰۹۰	*Palaniappan and Sizer (1997)*
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg °C)	۳۵۱۷	*Singh and Heldman (2001)*

تخمین ضریب انتقال حرارت هدایتی

ضریب هدایت حرارتی خلال سیب‌زمینی در حـین سـرخ کـردن به‌عنوان تابعی از محتوی رطوبت بـا اسـتفاده از معـادلات آندرسـن[1] (رابطه ۱۰) و اسپل[2] (رابطـه ۱۱) مطـابق رضـوی و اکبـری (۲۰۰۶) تخمین زده شد و تغییرات آن با دما و زمان فرآیند بررسی شد.

$$k=k_wX_w+k_s(1-X_w) \qquad (۱۰)$$

$$k=0.056+0.57X_w \qquad (۱۱)$$

در معادلات فوق k، k_w و k_s به ترتیب ضـریب هـدایت حرارتـی محصول، آب و مواد جامد محصول بر حسب (W/m °C) مـی‌باشـد. X_w کسر جرمی رطوبت بر حسب وزن مرطوب محصول است.

سنتیک انتقال رطوبت و ورغن

تغییرات رطوبت محصول در طی سرخ کردن از یک تابع نمـایی کاهشی پیروی می‌کند. مدل سنتیک کاهش رطوبـت در طـی سـرخ کـردن مشــابه Krokida و همکــاران (۲۰۰۱) و همچنــین Baik و Mittal (۲۰۰۵) نیز به صورت یک تابع نمایی به‌صورت رابطـه (۱۲) در نظر گرفته شد:

$$\ln\left(\frac{m_t-m_\infty}{m_i-m_\infty}\right)=-K_W t \qquad (۱۲)$$

در رابطه فوق m_i رطوبت اولیه محصول (g/g, db) می‌باشد. مدل سـنتیکی فـوق روی داده‌هـای تجربـی بررسـی شـده و بـا رسـم $Ln(m_t/m_0)$ در برابر زمان و بدست آوردن شیب خط حاصل ثابت سینتیکی K_W برای دماهای مختلف آزمایش برآورد شد.

مدل سنتیکی جذب روغن ارائه شده به‌صورت رابطه (۱۳) مطابق Krokida و همکاران (۲۰۰۱) می‌باشد:

$$O=O_{eq}\left[1-\exp\left(-K_o t\right)\right] \qquad (۱۳)$$

در این معادله O محتوی روغن محصول (گرم روغن در گرم ماده خشک) در زمان t، O_{eq} محتوی روغن در حالـت تعـادل یـا حـداکثر محتوی روغن در ماده خشک در زمان t=∞ ، t زمان سرخ کـردن و K_o نرخ ویژه یا ثابت سنتیک جذب روغن برای مدل بر حسـب (1/s) می‌باشد. در این مدل در زمان t=۰ محتوی روغن محصول صفر است و در زمان طولانی سرخ‌کردن محتوی روغن برابر با میزان تعادلی[3] یا O_{eq} می‌شود. برازش مدل تجربی بـا اسـتفاده از جعبـه ابـزار بـرازش منحنی در نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۰۹ انجام گرفت.

1 Anderson
2 Spell
3 Equilibrium value

ارتباط متغیرها با دمای روغن

ارتباط ضریب نفوذ موثر (D)، ضریب انتقال جرم (K_c)، ثابت‌های سنتیکی انتقال رطوبت (K_m) و روغن (K_o) و ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) با دمای روغن با استفاده از معادله آرنیوس مطابق رابطه (۱۴) بررسی شد و نتایج آن جهت آنالیز همزمان انتقال حرارت و جرم استفاده شد.

$$A = A_0 . \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (۱۴)$$

در رابطه فوق، A نشان دهنده پارامتر مورد مطالعه می‌باشد. E_a نشان دهنده انرژی فعال‌سازی و R ثابت جهانی گازها برابر با ۸/۳۰۹ ژول بر مول بر کلوین ($J.mol^{-1}.K^{-1}$) می‌باشد. T دمای مطلق برحسب کلوین است (Troncoso *and* Pedreschi, 2009).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

آنالیز آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ با سطح اطمینان ۹۵٪؛ جهت بررسی تاثیر تیمار دمای روغن روی متغیرهای مورد مطالعه شامل ضریب نفوذ موثر (D)، ضریب انتقال جرم (K_c)، ثابت‌های سنتیکی انتقال رطوبت (K_m) و روغن (K_o) و ضریب انتقال حرارت جابجایی (h)، به صورت طرح کاملاً تصادفی[1] (CRD) انجام شد. به منظور مقایسه معادلات هدایت حرارتی نیز آنالیز آماری دیگری با در نظرگیری تیمارهای دما*زمان و فرض معادلات به‌عنوان بلوک، در قالب طرح بلوک کامل تصادفی[2] (RCBD) انجام گرفت. مقایسه میانگین نیز به‌صورت آزمون دانکن[3] انجام شد.

نتایج و بحث

انتقال جرم

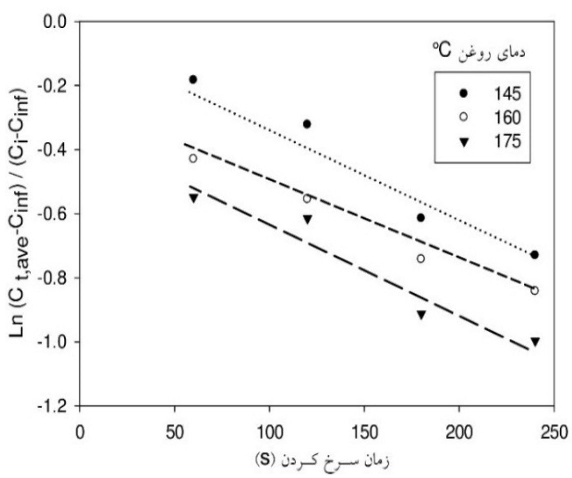
شکل (۲) نمودار تغییرات غلظت بدون بعد را در برابر زمان فرآیند نشان می‌دهد. از این نمودار برای محاسبه پارامترهای انتقال جرم در جدول (۲) استفاده شد. هر سه پارامتر عدد بایوت انتقال جرم، ضریب انتقال جرم و ضریب نفوذ موثر با افزایش دمای روغن زیاد شد و اختلاف بین دماهای مختلف فرآیند از نظر هر سه پارامتر انتقال جرم معنی‌دار بود و شدت از دست رفت آب در دماهای بالاتر بیشتر بود.

تغییرات بدست آمده برای پارامترهای انتقال جرم با نتایج پژوهش Yildiz و همکاران (۲۰۰۷) موافقت دارد، با این تفاوت که آن‌ها برای تغییرات عدد بایوت شکل منظمی را بیان نکردند در حالیکه در این پژوهش عدد بایوت انتقال جرم با افزیش دما به‌طور معنی‌داری، با توجه به تمایل بیشتر رطوبت به خروج از محصول، زیاد شد. در همین راستا، Farinu و Baik (۲۰۰۸) گزارش کردند با کاهش نرخ از دست رفتن آب محصول در دماهای پایین‌تر ضریب انتقال جرم نیز به طور منظم کاهش یافت. آن‌ها این کاهش را همچنین با کاهش شیب رطوبتی محصول و کاهش خروج حباب با افزایش زمان در مراحل انتهایی فرآیند سرخ کردن توضیح دادند.

جدول ۲- پارامترهای انتقال جرم به‌همراه انحراف معیار برای دماهای مختلف روغن

دمای روغن (°C)	عدد بایوت (Bi_m)	ضریب انتقال جرم ($K_c \times 10^{-5} m/s$)	ضریب نفوذ موثر ($D \times 10^{-9}\ m^2/s$)
۱۴۵	۲/۳۵ ±۰/۱۷^{C}	۱/۰۶ ±۰/۱۱^{C}	۱۱/۳۶ ±۰/۵۷^{C}
۱۶۰	۴/۳۳ ±۰/۱۹^{B}	۲/۳ ±۰/۱۱^{B}	۱۳/۲۵ ±۰/۳^{B}
۱۷۵	۶/۳۱ ±۰/۲۸^{A}	۴/۰۷ ±۰/۲۴^{A}	۱۶/۱۳ ±۰/۳۳^{A}

* حروف انگلیسی مقایسه بین دماها می‌باشد.



شکل ۲- نمودار غلظت بدون بُعد (رطوبت) در برابر زمان سرخ کردن

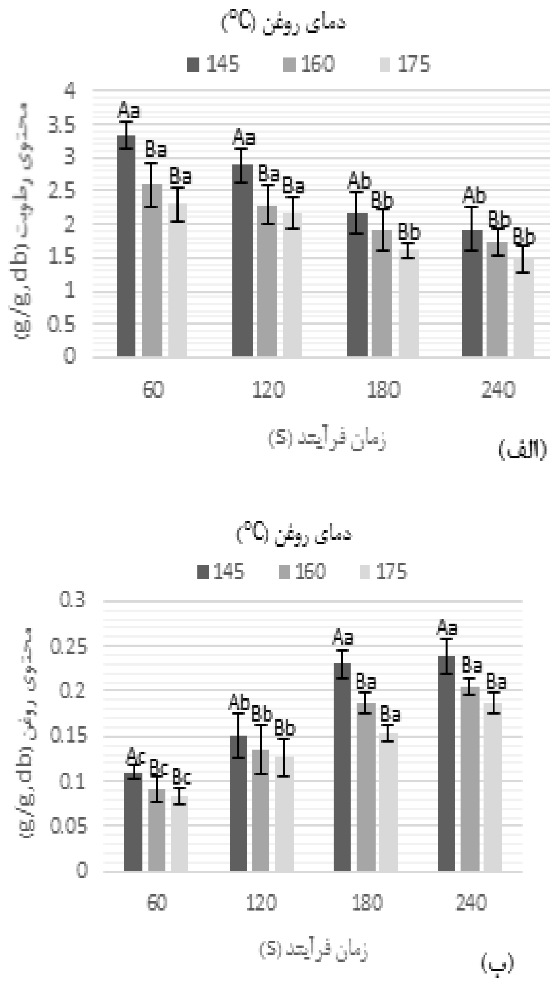
سینتیک انتقال همزمان رطوبت و روغن

شکل (۳) نمودار میله‌ای مقایسه میانگین تغییرات رطوبت (الف) و میانگین تغییرات محتوی روغن (ب) محصول طی سرخ‌کردن را در دماها و زمان‌های فرآیند نشان می‌دهد.

با مقایسه حروف معنی داری نشان داده شده در این شکل می‌توان ارتباط میان از دست رفتن آب محصول و جذب روغن با توجه به دمای روغن و همچنین زمان‌های ابتدایی فرآیند استنباط نمود. دمای ۱۴۵ °C با دو دمای دیگر مورد آزمون از نظر محتوی رطوبت و روغن اختلاف معنی‌داری داشت. این امر نشان‌دهنده تاثیر شدت تبخیر آب در دماهای بالا بر جذب روغن می‌تواند باشد. در زمان‌های ابتدایی فرآیند نیز اختلاف معنی‌داری تا زمان ۱۲۰ ثانیه میان محتوی رطوبت

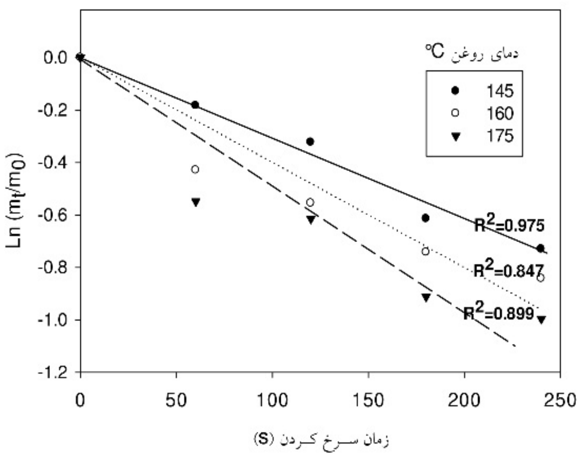
1 Completely randomized design
2 Randomized complete block design
3 Duncan test

و روغن مشاهده نشد که دلیل آن با وجود نرخ تبخیر بالا تا این زمان قابل توضیح است. Romani و همکاران (۲۰۰۸) گـزارش کردنـد در حدود سه دقیقه پس از شروع فرآیند نرخ کاهش آب و جـذب روغـن تقریباً ثابت است. آن‌ها همچنین بیان کردند، جذب روغن یک افزایش نسبتاً سریع و معنی‌دار را در ۱۲۰ ثانیه ابتدایی آغاز فرآیند نشان می‌دهد که دلیل آن می‌تواند جانشینی آب تبخیر شده از محصول باشد. در بخش‌های انتهایی نمودارهای جذب روغن، محتوی روغن جـذب شده در طی زمان معنی‌دار مشاهده نشـد کـه علـت آن طبـق بیـان Duran و همکاران (۲۰۰۷) می‌تواند ساختار فشـرده شـده محصـول باشد که به عنوان مانعی برای نفوذ روغن عمل مـی‌کنـد. بـه‌منظـور بررسی بهتر ارتباط انتقال اجزای جرمی رطوبت و روغن از ثابت‌هـای سینتیکی می‌توان بهره گرفت.



شکل ۳- نمودار میله‌ای مقایسه میانگین تغییرات محتوی رطوبت (الف) و تغییرات محتوی روغن (ب) محصول طی سرخ کردن

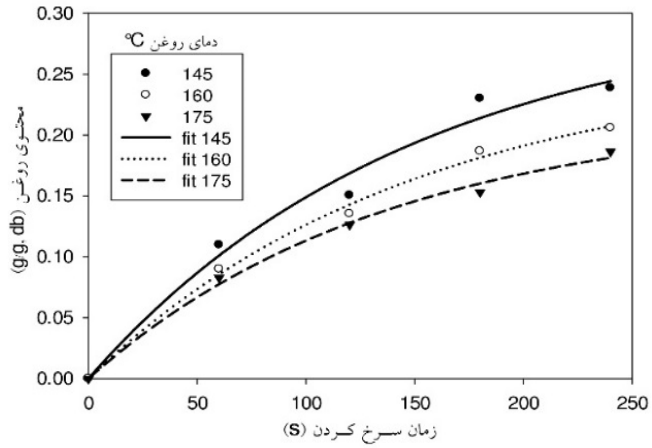
شکل (۴) خطی سازی مـدل انتقـال رطوبـت بصـورت تغییـرات لگاریتم طبیعی رطوبت بدون بُعـد را از ابتـدای زمـان فرآینـد نشـان می‌دهد. با محاسبه شیب خطوط برازش شده روی داده‌های لگـاریتم طبیعی، مقدار ثابت سنتیک کاهش آب (K_W) برای دمای ۱۴۵، ۱۶۰ و 175°C بـه ترتیـب ۰/۰۰۰۵±۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴±۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۰۲±۰/۰۰۴ بدست آمد. همان‌طور که مشخص است با افـزایش دمـای سرخ کردن ثابت سنتیک کاهش آب افزایش می‌یابد که نشان‌دهنـده سرعت خروج رطوبت بیشـتر از محصـول در دمـای بـالا نسـبت بـه دماهای کمتر است. Mohebbi و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که محتوی رطوبت نهایی محصول با افزایش دمای فرآیند سرخ کـردن، بدلیل خروج سریع‌تر جزء جرمی آب، کاهش می‌یابد و با افزایش زمان سرخ کردن نرخ کاهش آب محدود می‌گردد.



شکل ٤- برازش خطی مدل انتقال رطوبت بصورت تغییرات لگاریتم طبیعی رطوبت بدون بُعد از ابتدای زمان فرآیند

شکل (۵) برازش مدل سینتیکی جذب روغن را نشـان مـی‌دهـد. اطلاعات برازش مدل نیز در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به جدول ثابت سنتیک جذب روغن K_o با افزایش دمای سرخ کـردن نسبتاً زیاد می‌شود و از طرفی میزان تعـادلی روغـن O_{eq} بـا افـزایش دمای سرخ کردن کاهش می‌یابد. مجموع اطلاعات حاصل از برازش منحنی، کاهش جذب روغن در دماهای بالا را تائید می‌کند. این نتیجه با گزارش بسیاری از محققین مطابقت دارد (Duran *et al.*, 2007; Kita *et al.*, 2007; Ahromrit and Nema, 2010). صـباغی و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که جـذب روغـن محصـول نهـایی بـا افزایش دمای سرخ کردن محدود می‌شود که علت آن خروج شدیدتر رطوبت در جهت جریان مخالف روغن در دماهای بالا ذکر شده است. تغییرات ثابت سنتیک جذب روغن با زیاد شدن دمای روغن، افزایش ناچیزی نشان می‌دهد و پارامتر محتوی تعـادلی روغـن از ایـن نظـر

مطابق مدل ریاضی نقش تعیین‌کننده دارد.

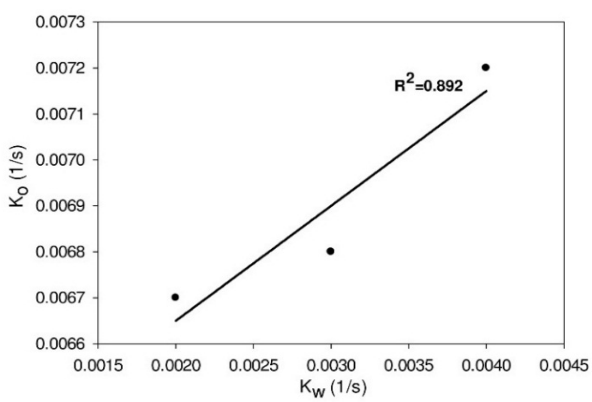


شکل ۵- برازش مدل سینتیکی جذب روغن در دماهای مختلف آزمایش

جدول ۳- اطلاعات برازش مدل جذب روغن روی داده‌های تجربی

R^2	خطای استاندارد	پارامترهای تابع		دمای روغن (°C)
		K_o (1/s)	O_{eq} (g/g, db)	
۰/۹۳۷۹±۰/۰۹۶۹	۰/۰۲۲۱±۰/۰۰۲	۰/۰۰۶۷±۰/۰۰۰۴	۰/۳۷۰۱±۰/۰۴۸۳	**۱٤٥**
۰/۹۷۶۶±۰/۰۲۶۱	۰/۰۱۲۶±۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۶۸±۰/۰۰۰۵	۰/۲۶۰۲±۰/۰۴۸۲	**۱٦۰**
۰/۹۷۸۰±۰/۰۱۶۲	۰/۰۱۱۷±۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۷۲±۰/۰۰۰۸	۰/۲۲۱۲±۰/۰۱۶۸	**۱۷٥**

شکل (۶) ارتباط خطی بین ثابت‌های سنتیک کاهش آب و جذب روغن بدست آمده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. اگرچه ثابت سینتیک جذب روغن در محتوی نهایی روغن محصول نقش تعیین کننده از نظر مدل ریاضی ندارد، اما مطابق این شکل می‌توان گفت که افزایش ثابت سنتیک کاهش آب موجب افزایش جزئی ثابت سنتیک جذب روغن نیز می‌شود. این مشاهده با گزارش Debnath و همکاران (۲۰۰۳) نیز مطابقت دارد. آن‌ها همچنین بیان کردند افزایش زمان خشک‌کردن به عنوان یک پیش تیمار برای محصول قبل از سرخ‌کردن می‌تواند موجب کاهش ثابت سینتیک جذب روغن نیز شود. بنابراین آنچه استنباط می‌شود این است که علاوه بر سرخ‌کردن در دمای بالا، پیش خشک‌کردن جزئی نیز می‌تواند به عنوان راهکار کاهش جذب روغن تا حدی معرفی گردد. این تاثیر به دلیل فشردگی ماتریس مواد[1] (کاهش تخلخل[2]) و در نتیجه کاهش نفوذ روغن بعد از خروج از سرخ‌کن و سردشدن بیان شده است (Debnath *et al.*, 2003).



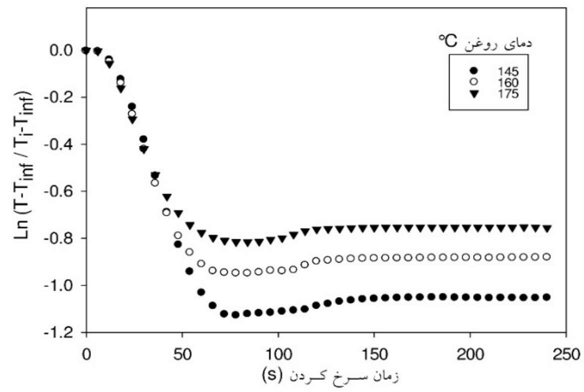
شکل ٦- ارتباط خطی بین ثابت‌های سنتیک کاهش آب و جذب روغن

میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی

شکل (۷) نمودار تغییرات نسبت دمای بدون بعد را در برابر زمان برای دماهای مختلف سرخ کردن نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که نرخ حرارت‌دهی خلال سیب‌زمینی با توجه به دمای مرکزی با افزایش زمان سرخ کردن کاهش می‌یابد. با استفاده از بخش خطی این نمودار برای دماهای مختلف ضریب انتقال حرارت جابجایی تخمین زده شد. نتایج این تخمین در جدول (۴)

1 Material matrix
2 Porosity

آورده شده است.



شکل۷- تغییرات لگاریتم دمای بدون بعد در برابر زمان در دماهای مختلف روغن

عدد بایوت انتقال حرارت (Bi_h) و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش دمای روغن کاهش یافت و بین دمای ۱۶۰ و ۱۷۵ °C از این نظر اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. کاهش این پارامترها مطابق گزارش Yildiz و همکاران (۲۰۰۷) می‌تواند به این دلیل باشد که نرخ کاهش رطوبت محصول در دماهای بالا بیشتر است. با افزایش نرخ کاهش رطوبت مقدار بیشتری از انرژی ورودی به محصول به تبخیر اختصاص می‌یابد. این امر موجب کاهش میزان انرژی در دسترس برای افزایش انرژی داخلی و در نتیجه کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی در دمای بالا می‌شود. این حالت با نتیجه محققین دیگر که از روش دمای سطحی استفاده کردند، موافقت ندارد (Costa *et al.*, 1999; Sahin *et al.*, 1999; Budzaki and Seruga, 2004). صباغی و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی کسر حرارتی مورد نیاز برای تبخیر و تعیین رابطه نمایی برای تغییرات آن طی سرخ‌کردن، بیان کردند که در روش دمای سطحی، با کاهش دمای روغن کسر حرارت مورد نیاز برای تکمیل فرآیند تبخیر تا خشک شدن کامل محصول بیشتر است. درنتیجه این امر را دلیلی بر کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی در دمای کمتر روغن دانستند.

جدول ٤- پارامترهای انتقال حرارت به همراه انحراف معیار برای دماهای مختلف روغن

دمای روغن (°C)	عدد بایوت (Bi_h)	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W/m^2°C$)
۱٤٥	۰/۵۴±۰/۰۷^A	۱۲۰/۳۱±۱۵/۶^A
۱٦۰	۰/۵±۰/۰۳^B	۱۱۱/۴±۶/۶۸^B
۱۷٥	۰/۴۴±۰/۰۹^B	۹۷/۸۵±۲۰/۰۵^B

* حروف انگلیسی مقایسه بین دماها می‌باشد.

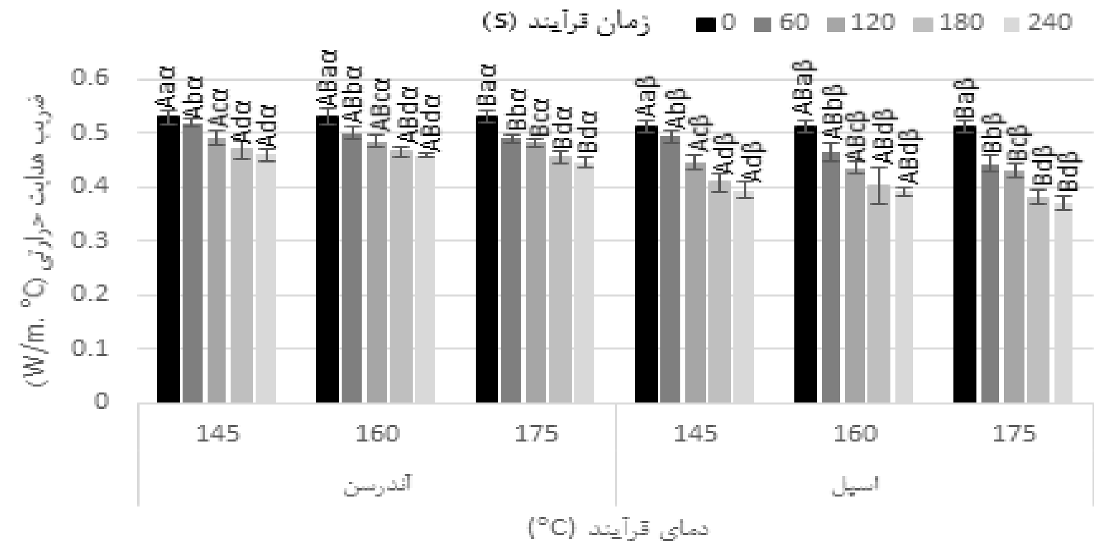
ضریب انتقال حرارت هدایتی محصول

جدول (۵) نشان دهنده جدول آنوا برای مقایسه آماری است، با توجه به این جدول اختلاف میان دماهای فرآیند و زمان از نظر هدایت حرارتی محصول معنی دار شد. اختلاف دو معادله آندرسن و اسپل نیز از نظر پیش بینی هدایت حرارتی معنی دار مشاهده شد. روند تغییرات هدایت حرارتی هم با افزایش دما و هم با افزایش زمان فرآیند همواره کاهشی بود و در نتیجه اثر متقابل در آزمون آماری معنی‌دار نشد.

شکل (۸) مقایسه میانگین هدایت حرارتی محصول طی سرخ کردن در دماها و زمان‌های مختلف بر اساس معادله آندرسن (الف) و اسپل (ب) نشان می‌دهد. Sahin و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند که هدایت حرارتی ماده غذایی به تخلخل و ساختار فیزیکی و شیمیایی آن بستگی دارد و با شروع فرآیند سرخ کردن و خروج آب از محصول و افزایش تخلخل در محصول هدایت حرارتی محصول به تدریج کاهش می‌یابد. در طی سرخ‌کردن آب از محصول تبخیر شده و روغن به محصول نفوذ می‌کند و از آنجا که هدایت حرارتی سیب زمینی و روغن از آب کمتر است، هدایت حرارتی محصول با کاهش رطوبت و با افزایش زمان و یا دمای سرخ کردن کاهش می‌یابد.

جدول ۵- جدول ANOVA برای مقایسه معادلات و تیمارها در محاسبه ضریب هدایت حرارتی

تیمار	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	F	معنی داری (sig.)
مدل	۶/۵۱۵	۱۶	۰/۴۰۷	۱۹۹۹	۰/۰۰۰
دما	۰/۰۰۲	۲	۰/۰۰۱	۴/۰۶۵	۰/۰۴۱
زمان	۰/۰۴۰	۴	۰/۰۱۰	۴۹/۵۳۹	۰/۰۰۰
دما*زمان	۰/۰۰۱	۸	۰/۰۰۰	۰/۵۸۵	۰/۷۷۴
بلوک (معادله)	۰/۰۱۷	۱	۰/۰۱۷	۸۲/۳۵۹	۰/۰۰۰
خطا	۰/۰۰۳	۱۴	۰/۰۰۰		
کل	۶/۵۱۷	۳۰			



شکل ۸- نمودار میله‌ای مقایسه میانگین هدایت حرارتی محصول طی سرخ کردن در دماها و زمان‌های مختلف براساس معادله آندرسن (الف) و اسپل (ب)؛ حروف انگلیسی بزرگ مقایسه دماها، حروف انگلیسی کوچک مقایسه زمان‌ها، حروف یونانی مقایسه معادله‌ها می‌باشد.

با خشک شدن محصول و افزایش درصد ماده خشک آن تاثیر ماده خشک در هدایت حرارتی طبق معادله آندرسن بیشتر شده و درنتیجه معادله آندرسن میانگین هدایت حرارتی بیشتری را نسبت به معادله اسپل نشان می‌دهد. هدایت حرارتی محصول پس از ۲۴۰ ثانیه در دماهای ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ °C به ترتیب براساس معادله آندرسن ۰/۴۶، ۰/۴۵ و ۰/۴۴ W/m °C و طبق معادله اسپل ۰/۳۹، ۰/۳۸ و ۰/۳۷ W/m°C برآورد شد. هدایت حرارتی تخمین زده شده بر اساس معادله اسپل به نتایج مقالات نزدیکتر است. به‌طور کلی تغییرات هدایت حرارتی محصول در حین سرخ‌کردن ناچیز است و حداقل هدایت حرارتی محصول در دماهای مختلف به هم نزدیک می‌باشد اما دمای ۱۶۰ °C به عنوان مرز معنی داری اثرات دما (شکل-۸) روی میزان هدایت حراتی طی زمان مشخص شد. Wang و Brennan (۱۹۹۲) نیز هدایت حرارتی سیب‌زمینی را به محتوی رطوبت آن ارتباط دادند و نتیجه گرفتند که هدایت حرارتی سیب زمینی با کاهش رطوبت آن کم می‌شود و مستقل از دما می‌باشد. همچنین Ziaiifar و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان کردند که هدایت حرارتی موثر (k) برای ناحیه هسته با افزایش زمان سرخ کردن زیاد شده و به حداکثر خود ۰/۶ W/m°C در سه دقیقه سرخ‌کردن رسیده و سپس به ۰/۴ W/m°C در پایان فرآیند کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند مربوط به تغییرات فیزیکوشیمیایی در ناحیه هسته مانند ژلاتینه شدن نشاسته و کاهش رطوبت باشد. به‌طور کلی آنچه از معادلات تجربی به کار رفته نتیجه می‌شود این است که هدایت حرارتی در حین سرخ‌کردن با توجه به نحوه تغییرات آن از یک معادله نیمه لگاریتمی یا نمایی کاهشی تبعیت می‌کند.

وابستگی پدیده‌های انتقال به دمای فرآیند

برای بررسی ارتباط متغیرهای انتقال حرارت و جرم با دمای فرآیند از معادله آرنیوس استفاده شد. جدول (۶) ثابت‌های محاسبه شده در معادله آرنیوس شامل مقدار موثر هر متغیر (A_0) و انرژی فعال‌سازی (E_a) را برای متغیرهای مختلف در این پژوهش به همراه ضریب همبستگی خطی نشان می‌دهد. تمام انرژی‌های فعال‌سازی گزارش شده در جدول (۶)، بجز انرژی فعال‌سازی برای ضریب انتقال حرارت، مثبت بدست آمدند. با استفاده از اطلاعات این جدول می‌توان متغیرهای انتقال حرارت و جرم را به‌عنوان تابعی از دمای فرآیند پیش‌بینی کرد. مطابق بیان Troncoso و Pedreschi (۲۰۰۹) انرژی فعال‌سازی برای فرآیندهای انتشار و انتقال شناساگر مکانیسم غالب می‌باشد. انرژی‌های فعال‌سازی بالا به‌طور معمول در موادی با رطوبت پایین ناشی از برهم‌کنش قوی آب-سوبسترا بدست می‌آید. انرژی‌های فعال‌سازی بدست آمده در این پژوهش به نتایج محققین از جمله Duran و همکاران (۲۰۰۷) نزدیک است.

جدول ٦- متغیرهای معادله آرنیوس ($A=A_0exp(-Ea/RT)$) برای ثابت‌های مربوط به پدیده‌های انتقال

A	A_0	E_a (J/mol)	R^2 خطی
ضریب انتقال جرم (K_c)	۵۹۷۲/۹۷۲	۶۹۹۲۱/۶۳۹	۰/۹۹۵
ضریب نفوذ موثر (D)	۲/۰۹۹×۱۰^{-۶}	۱۸۱۶۲/۹۹۲	۰/۹۹۱
ضریب انتقال حرارت جابجایی (h)	۰/۰۱۵	-۱۰۶۸۸/۹۲۱	۰/۹۷۲
ثابت سنتیکی انتقال رطوبت (K_w)	۶۴/۶۵۰	۳۶۰۲۶/۹۵۹	۰/۹۹۳
ثابت سنیتیکی انتقال روغن (K_o)	۰/۰۱۹	۳۷۰۸/۷۰۵	۰/۸۸۴۱

نتیجه‌گیری

در این پژوهش انتقال جرم و حرارت طی سرخ‌کردن خلال سیب‌زمینی بررسی شد. اختلاف بین دماهای مختلف فرآیند از نظر هر سه پارامتر عدد بایوت انتقال جرم، ضریب انتقال جرم و ضریب نفوذ موثر معنی‌دار بود. مدل‌های سینتیکی بخوبی توانستند تخمین پارامترهای انتقال جرم را تائید نمایند. عدد بایوت انتقال حرارت و ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش دمای روغن کاهش یافت و بین دمای ۱۶۰ و ۱۷۵ °C از این نظر اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد و با توجه به معنی‌دار نشدن اختلاف محتوی رطوبت در این دماها می‌توان آن را تائیدی بر ارتباط مستقیم سرعت خروج رطوبت و ضریب انتقال حرارت دانست. با شروع فرآیند سرخ کردن و خروج آب از محصول و افزایش تخلخل در محصول هدایت حرارتی محصول به تدریج کاهش یافت از این نظر اختلاف سنجش دو معادله اسپل و آندرسن معنی دار بوده و نتایج معادله اسپل به نتایج مقالات نزدیکتر بود. طبق معادله آرنیوس برهم کنش آب و مواد جامد در محصولی مانند سیب‌زمینی تحت تاثیر دمای روغن، تعیین‌کننده رفتار پارامترهای پیش‌بینی شده در این پژوهش بود.

منابع

Ahromrit, A., and Nema, P.K., 2010, Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin, sweet potato and taro. *Journal of Food Science and Technology*, 47, 632-637.

Alvis, A., Vélez, C., Rada-Mendoza, M., Villamiel, M., and Villada H.S., 2009, Heat transfer coefficient during deep-fat frying. *Food Control*, 20, 321-325.

Andres, A., Arguelles, A., Castello, M.L., and Heredia, A., 2012, Mass transfer and volume changes in French fries during air frying. *Journal of Food and Bioprocess Technology*, Doi: 10.1007/s11947-012-0861-2.

AOAC, 2000, Official methods of analysis. 17th ed., Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC, *Unites States*.

Baik, O.D., and Mittal, G.S., 2005, Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying, *Food Research International*, 38, 183-191.

Blumenthal, M.M. and Stier, R.F., 1991, Optimization of deep-fat frying operations, *Trends in Food Science and Technology*, 2, 144-148.

Budzaki, S. and Seruga, B., 2004, Determination of convective heat transfer coefficient during frying of potato dough. *Journal of Food Engineering. Journal of Food Engineering*, 66, 307-314.

Costa, R.M., Oliveira, F.A.R., Delaney, O., and Gekas, V., 1999, Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying. *Journal of Food Engineering*, 39, 293-299.

Debnath, S., Bhat, K.K., and Rastogi, N.K., 2003, Effect of pre-drying on kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of chickpea flour-based snack food. Lebensm.-Wiss. *U.-Technol*, 36, 91-98.

Dincer, I., 1996. Modelling for heat and mass transfer parameters in deep frying of products. *Heat and Mass Transfer*, 32, 109-113.

Duran, M., Pedreschi, F., Moyano, P., and Troncoso, E., 2007, Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering*, 81, 257-265.

Farid, M.M., and Chen X.D., 1998, the analysis of heat and mass transfer during frying of food using a moving boundary solution procedure. *Journal of Heat and mass transfer*, 34, 69-77.

Farinu, A. and Baik, O.-D., 2008, Convective mass transfer coefficients in finite element simulations of deep fat frying of sweetpotato. *Journal of Food Engineering*, 89,187-194.

Farinu, A., and Baik, O. D., 2007, Heat transfer coefficients during deep fat frying of sweetpotato: Effects of product size and oil temperature, *Food Research International*, 40, 989-994.

Farkas, B.E., Sing R.P., and Rumsey T.R., 1996, Modelling heat and mass transfer in immersion frying. I, Model

development. *Journal of Food Engineering*, 29, 211-226.

Gupta, P., Shivhare, U.S. and Bawa, A.S., 2000, Studies on frying kinetics and quality of French fries. *Drying Technology*, 18, 311-321.

Kita, A., Lisińska, G., and Gołubowska, G., 2007, The effects of oils and frying temperatures on the texture and fat content of potato crisps. *Food Chemistry*, 102, 1-5.

Krokida, M.K., Oreopoulou, V., and Maroulis, Z.B., 2000, Water loss and oil uptake as a function of frying time, *Journal of Food Engineering*, 44, 39-46.

Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B., and Marinos-Kouris, D., 2001, Effects of pre-drying on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*, 49, 347-354.

Loon, W.A.M.V., Visser, J.E., Linssen, J.P.H., Somsen, D.J., Klok, H.J., and Voragen, A.G.J., 2007, Effect of pre-drying and par-frying conditions on the crispness of French fries. *European Food Research and Technology*. 225, 929-935.

Mohebbi, M., Fathi, M., and Shahidi, F., 2011, Genetic algorithm artificial neural network modeling of moisture and oil content of pretreated fried mushroom. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 603-609.

Moyano, P.C., and Pedreschi, F., 2006, Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. LWT - *Food Science and Technology*, 39, 285-291.

Palaniappan, S., and Sizer, C. E., 1997, Aseptic process validated for foods containing particulates. *Food Technology*, 51, 60-68.

Parkash, S., and Gertz, C., 2004, New theoretical and practical aspects of the frying Process, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 106, 722-727.

Pedreschi, F., Hernandez, P., Figueroa, C., and Moyano, P.C., 2005, modeling water loss during frying of potato slices. *International Journal of Food Properties*, 8, 289-299.

Razavi, M., and Akbari, R., 2006, Biophysical properties of agricultural and food materials. Ferdosi university of Mashhad publication, pp. 255-256.

Romani, S., Bacchiocca, M., Rocculi, P., and Rosa, M.D., 2008, Effect of frying time on acrylamide content and quality aspects of French fries. *European Food Research and Technology*, 226, 556-560.

Sabbaghi, H., Ziaiifar, A. M., Sadeghi Mahoonak, A., Kashaninejad, M., and Mirzaei, H., 2015, Evaluation of mathematical models to describe the effect of temperature. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 46(2), 135-145.

Sabbaghi, H., Ziaiifar, A .M. Sadeghi Mahoonak, A., kashaninejad, M., and Mirzaei, H., 2014, Estimation of convective heat transfer coefficient as function of the water loss rate during frying process. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 1394(11), 473-484. doi:10.22067/ifstrj.v1394i11.29653

Sahin, S., Sastry, S.K., and Bayindirli, L., 1999, the determination of convective heat transfer coefficient during frying, *Journal of Food Engineering*, 39, 307-311.

Saravacos, G. D. and Maroulis, Z. B., 2001, Transport Properties of Foods. Marcel Dekker, New York.

Singh, R.P., and Heldman, D.R., 2001, Introduction to food engineering, (3rd Ed.). London, UK: Academic Press.

Taler, J., 2014, Superposition method for multidimensional heat conduction problems, Hetnarski, R. B. (Ed.), Encyclopedia of Thermal Stresses, *Springer Netherlands*, pp. 4708-4718.

Treybal, R.E., 1995, Mass-transfer operations, (3rd Ed.), McGraw Hill Publication. USA.

Troncoso, E., and Pedreschi, F., 2009, Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. LWT-*Food Science and Technology*, 42, 1164-1173.

Ufheil, G., and Escher, F., 1996, Dynamics of oil uptake during deep-fat frying of potato slices, *Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie*. 29, 640-644.

Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G. and Raoult-Wack, A.L., 2002, Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering*, 53, 161-176.

Wang, N., and Brennan, J.G., 1992, Thermal conductivity of potato as a function of moisture content, *Journal of Food Engineering*, 17, 153-160.

Yildiz, A., Palazoglu, K., and Erdogdu, F., 2007, Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 11-17.

Zheleva, I., and Kamburova, V., 2009, modeling of heating during food processing. Costa, R., and Kristbergsson, K. (Eds.), *Predictive modeling and risk assessment*, Springer US, pp. 79-99.

Ziaiifar, A.M., Heyd, B., and Courtois, F., 2009, Investigation of effective thermal conductivity kinetics of crust and core regions of potato during deep-fat frying using a modified Lees method. *Journal of Food Engineering*, 95, 373-378.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 13, No. 2, June. July. 2017, p. 379- 392

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۳، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۳۹۶ ص.۳۹۲-۳۷۹

Analysis of heat and mass transfer during frying process of potato strips

H. Sabbaghi[1], A. M. Ziaiifar[2*], M. Kashaninejad[3]
Received: 2015.12.18
Accepted: 2016.03.15

Introduction: Frying phenomena occur during the immersion of the product in oil at a temperature of 150–200 ºC, where a simultaneous heat and mass transfer take place. This is the most popular thermal processes of potato cooking. This fast drying is critical to improve the mechanical and structural properties of the final product. These conditions lead to high heat transfer rates, rapid cooking, browning, texture and flavor development. The fried potato is easier to transport and provides better texture. Researchers have assumed the existence of two regions for fried product, separated by an interface: the core (unfried) and crust (fried) regions. In general, frying process is very complex for two main reasons: i) due to the simultaneous heat and mass transfer between food material and frying oil, ii) due to the progressive deterioration of the oil and structural changes in foods (crust and core regions). The moving boundary problem may be found in many areas of frying research involving heat and/or mass transfer. In this study, heat and mass transfer is entirely investigated during frying of potato strips. The transport phenomena during frying are including: i) Heat convection from the hot oil to the interface via the crust region, ii) Water evaporation at the moving interface at a temperature of 100 ºC, iii) The unsteady state heat conduction in both regions of crust and core, iv) The oil uptake into food. As a result, high temperature and low moisture conditions develop as frying proceeds. Water vapor bubbles escaping from the surface of the food cause considerable turbulence in the oil. Therefore, Heat and mass transfer are dependent on each other during frying process. In fact, heat and mass transfer during frying can be controlled by heat transfer at the product surface. Evaporation rate depends on the temperature difference between oil and boiling point of water. There is little information on modeling, both empirical and phenomenological, for moisture loss and oil uptake during frying. Knowledge of accurate heat and mass transfer parameters is important for modeling processes. Designing of frying processes is possible through the use of mathematical models. The aim of this study is to develop a more completely and realistic approach for determining of heat and mass transfer parameters and their relation to oil temperatures. The main process parameters influencing oil uptake are frying temperature and duration. Heat transfer coefficients for different oil temperatures determined using simple method. Mass transfer of water was assumed to be governed by Fick's law of diffusion. For more details, empirical models were used to describe the mass transport in forms of moisture and oil.

Materials and Methods: The frying operation of potato strips was performed in the fryer that was equipped by thermo controller system with K type thermocouple at three different oil temperature of 145, 160 and 175 ºC for 60, 120, 180 and 240 seconds. The core temperature changes of product recorded on computer during process using T type thermocouple connected to data logger. The moisture and oil content of samples measured for each process time and temperatures. The heat and mass transfer parameters such as kinetic coefficients of moisture (K_m) and oil transfer (K_o), mass transfer coefficient (K_c), effective diffusivity (D) and heat transfer coefficient (h) were evaluated with dimensionless temperature and concentration ratio plots and also empirical equations. Relationship of these parameters to the temperature of the oil investigated using the Arrhenius equation. Thermal conductivity of potato strips during frying determined as a function of moisture content using the Anderson and Spell equations.

Results & Discussion: The results showed that mass transfer Biot number (Bi_m), mass transfer coefficient (K_c) and effective moisture diffusivity (D) increased significantly with increasing in oil temperature. In regression models, the linear correlation between kinetic constant of water loss and oil uptake was observed that is verification on effect of drying pretreatment on reducing oil uptake. In fact, with increasing of oil temperature the kinetic constant of water loss increased and caused increased in kinetic constant of oil uptake. Kinetic models could correctly confirm determination of mass transfer parameters. The heat transfer Biot number (Bi_h), convective heat transfer coefficient (h) and product thermal conductivity (k) decreased significantly with an

3, 2 and 3. Ph. D. Candidate, Associate Professor and Professor of Food Processing Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources
(*Corresponding Author Email: ziaiifar@gmail.com).

increase in process temperature. With increasing in the rate of evaporation, following greater amount of input energy used for water loss. This would reduce the amount of available energy to increase internal energy of product and thus reduce the convective heat transfer coefficient at high temperatures. Frying process caused remove of water from product and increasing of porosity, thus observed gradually fell in thermal conductivity. Although the minimum thermal conductivity at various temperatures are close together, but two equations of Anderson and Spell showed significant difference for values of thermal conductivity and Spell was more close to published papers. High activation energy is achieved for lower moisture content that is normally due to the strong water-substrate interaction.

Keywords: Frying, Potato strip, Biot number, Mass transfer, Heat transfer